

des temperaturabhängigen Spektrums des Hohlraumstrahlers, die um 1900 zur Verifizierung des Planck'schen Strahlungsgesetzes führten, in der damaligen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt auch bei THz-Frequenzen durchgeführt wurden. Dies ist u. a. dem nachfolgenden Artikel von Prof. Dr. Heinz-Wilhelm Hübers vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt zu entnehmen, der als ausführliche Einführung in das Gebiet der THz-Strahlung sowohl messtechnische Komponenten und Strahlungsquellen als auch den heutigen Stand der Anwendungen auf den Gebieten beschreibt, denen auch der Wissenschaftsrat große wirtschaftliche Bedeutung attestiert. Ihm folgen zwei Artikel zur absoluten radiometrischen Bestimmung der Intensität von THz-Strahlung. Dr. Andreas Steiger und seine Kollegen erläutern die beiden aus der optischen Radiometrie in den THz-Bereich ausgedehnten Methoden, die sich zum einen auf berechenbare Strahlungsquellen und zum anderen auf absolut kalibrierte Detektoren stützen, und die damit bisher erzielten Resultate. Dr. Joern Beyer und Dr. Christian Monte stellen in diesem Zusammenhang einen neu entwickelten Detektor für sehr geringe Strahlungsleistung vor, der basierend auf supraleitenden Bolometern mit Heliumgekühlter Elektronik eine extreme Empfindlichkeit und Linearität beim Nachweis von Terahertz-Strahlung erreicht.

Zwar kann THz-Strahlung aufgrund ihrer zu geringen Quantenenergie Atome nicht ionisieren und damit organische Substanzen auf diese Weise nicht schädigen. Trotzdem ist es angebracht, die biologische Wirkung von Exposition mit THz-Strahlung mit dem Ziel zu untersuchen, schließlich Grenzwerte zu etablieren, was im Beitrag von Christian Jastrow und seinen Mitautoren beschrieben wird. Sebastian Priebe und seine Kollegen beleuchten die Stärken des Einsatzes von THz-Strahlung für die Übertragung von Bildern und Daten. Der Gewinn an Bandbreite ist hierbei gegen die starke atmosphärische Absorption abzuwägen, was die Anwendung auf kurze Distanzen begrenzt. Shekhar Priyadarshi und seine Mitautoren geben ein Beispiel für die inzwischen sehr breit eingesetzte THz-Spektroskopie – hier angewandt zur Symmetrieuntersuchung von Halbleiterstrukturen.

Ihren 2008 in Betrieb genommenen Niederenergie-Elektronenspeicherung „Metrology Light Source“ (MLS) hat die PTB so ausgelegt, dass Synchrotronstrahlung im Infrarot- und Terahertz-Bereich mit hoher Intensität erzeugt werden kann. Am langwelligen Ende des Terahertz-Spektrums kann durch eine in dieser Form einmalige Elektronenoptik kohärente THz-Strahlung erzeugt werden, deren Intensität um viele Größenordnungen über derjenigen der inkohärenten Strahlung liegt. Das Team um Dr. Ralph

Müller beschreibt diese neuartige einmalige THz-Quelle und ihre Einsatzmöglichkeiten im letzten Beitrag.

Bei der Lektüre dieses Heftes wird man die Dynamik dieses neuen Arbeitsgebietes feststellen können. Forschung, Entwicklung und Kommerzialisierung stehen erst am Anfang – wie auch die Metrologie. Man wird aber auch feststellen, dass die Terahertzlücke nicht nur technisch mit neuen Entwicklungen ausgefüllt werden muss, auch sprachlich – und die Sprache ist ein Gradmesser des gegenseitigen Verstehens – muss die Lücke überbrückt werden, wenn man die Gemeinsamkeiten beispielsweise von Sendern und Strahlern, von Empfängern und Detektoren, von Wellenleitern und Linsen herausarbeiten will. Zwei Denkwelten warten auf ihre Verschmelzung auf dem Weg zu neuen Erkenntnissen und Produkten.

- [1] Gerhard Samulat: Vorstoß in die Terahertzlücke. Spektrum der Wissenschaft, April 2008, S. 84
- [2] Wissenschaftspolitische Stellungnahme des Wissenschaftsrats zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Rostock, 08.05.2008, S. 71
- [3] T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, M. Bieler, U. Siegner, C. Monte, B. Gutschwager, J. Hollandt, A. Steiger, L. Werner, R. Müller, G. Ullm, I. Pupeza, M. Koch: THz Metrology. Frequenz 62 (2008), 5–6 p. 137

Terahertz-Technologie an der Schwelle von wissenschaftlichen Anwendungen zu kommerzieller Nutzung

Heinz-Wilhelm Hübers¹

1 Einleitung

Der Terahertz (THz)-Spektralbereich liegt im elektromagnetischen Spektrum zwischen den Millimeter-Wellen und der Infrarot-Strahlung. Typischerweise werden darunter Frequenzen von 0,3 THz, entsprechend einer Wellenlänge von 1 mm, und ca. 10 THz (30 µm) verstanden. Eine strenge Definition dieses Spektralbereichs existiert jedoch nicht. Andere, früher gebräuchliche Begriffe sind Submillimeter- und Ferninfrarot-Strahlung. Letzterer bezeichnet in Deutschland gemäß der DIN 5031 den Wellenlängenbereich von 50 µm bis 1 mm. In den vergangenen Jahren haben die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Spektralbereich rasant zugenommen und zu einer Reihe von technologischen Durchbrüchen geführt, die die Grundlage für eine breite wissenschaftliche sowie wirtschaftliche Nutzung von THz-Technologie legen. Der THz-Spektralbereich steht heute an der Schwelle von rein akademischer Forschung zu kommerziellen Anwendungen.

Der Grund für die wissenschaftliche wie auch die wirtschaftliche Erschließung ist die Tatsache, dass eine Vielzahl physikalischer Phänomene charakteristische Energien haben, die THz-Frequenzen entsprechen. Dazu zählen die Rotationsschwingungen einfacher Moleküle, insbesondere auch von Radikalen wie z. B. OH, die viele chemische Reaktionen treiben. Dies hat schon frühzeitig seit den 1970er Jahren dazu geführt, dass Teleskope und Observatorien für Beobachtungen im THz-Spektralbereich aufgebaut wurden. Aktuelle Beispiele sind ESAs Herschel Space Observatory [1], das von NASA und DLR gemeinsam entwickelte Stratosphärenobservatorium für Infrarot-Astronomie SOFIA [2] und das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) [3]. Für die Erdbeobachtung ist der THz-Bereich wichtig, da sich eine Reihe von Molekülen z. B. die sogenannten Ozon-Killer HCl oder HBr nur bei THz-Frequenzen messen lassen. Dementsprechend sind Satelliten zur Messung der Stratosphärenchemie mit THz-Spektrometern ausgestattet [4]. Aber nicht nur einfache Moleküle

sondern auch komplizierter aufgebaute Biomoleküle lassen sich anhand ihrer charakteristischen Schwingungen im THz-Bereich untersuchen [5]. Bei der Erforschung von Festkörpern erlaubt THz-Strahlung neue Einblicke, da sowohl natürliche Halbleitermaterialien als auch künstlich hergestellte Halbleiter-Heterostrukturen entsprechende charakteristische Energien haben. Diese sind auf Akzeptoren, Donatoren, Phononen oder Intersubband-Übergänge zurückzuführen. Zudem haben viele Supraleiter eine Energielücke, die THz-Frequenzen entspricht.

Lange Zeit war es nur schwer möglich, Strahlung aus dem Frequenzbereich zwischen 0,3 und etwa 10 THz empfindlich nachzuweisen oder hinreichend leistungsstarke, brillante, breitbandige oder schmalbandige, aber durchstimmbare THz-Strahlung zu erzeugen. Es fehlte an geeigneten Strahlungsquellen. Man sprach daher auch von der technologischen „THz-Lücke“. Um diese Lücke zu schließen, haben sich in den letzten Jahren einige vielversprechende Ansätze herausgebildet. Die Erzeugung von THz-Strahlung mit gepulsten Femtosekundenlasern oder durch Mischen der Strahlung zweier Laserdioden aus dem sichtbaren oder nah-infraroten Spektralbereich hat ganz wesentlich zur Schließung der „THz-Lücke“ beigetragen. Mit Quantenkaskadenlasern steht seit wenigen Jahren eine leistungsfähige, kompakte Laserstrahlungsquelle zur Verfügung. Speicherringe wie BESSY II, ANKA oder die MLS oder Freie Elektronen Laser (FEL) wie FELBE oder FELIX erzeugen THz-Strahlung unterschiedlicher Charakteristik, die für verschiedenste Experimente genutzt werden kann. Durch extrem kurze Elektronenpakete in speziellen Betriebszuständen der Speicherringe erzeugte THz-Strahlung zeichnet sich durch ihre Breitbandigkeit aus, FEL-Strahlung vor allem durch extrem hohe Leistungen. Auch auf dem Gebiet der Detektorentwicklung hat es rasante Fortschritte gegeben. Diese wurden sehr stark durch astronomische Anwendungen, insbesondere die Satellitenobservatorien getrieben. Heute stehen großformatige Arrays mit bis zu mehreren 100 Bildpunkten zur Verfügung. Die

¹ Prof. Dr. Heinz-Wilhelm Hübers, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Planetenforschung Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin und Institut für Optik und Atomare Physik Technische Universität Berlin Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin E-Mail: heinz-wilhelm.huebers@dlr.de

Empfindlichkeit dieser Detektoren ist durch das Hintergrundrauschen begrenzt. Für Heterodynenspektrometer gibt es Mischer mit einer Empfindlichkeit, die geringfügig über dem Quantenrauschen ist. Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass diese Detektoren und Arrays eine aufwendige Kühlung auf wenige Kelvin oder sogar auf einige hundert mK erfordern. THz-Detektoren, die bei Raumtemperatur eine vergleichbare Empfindlichkeit haben, bzw. ungekühlte Detektorarrays mit einigen Tausend oder mehr Bildpunkten stehen nicht zur Verfügung. In dieser Hinsicht existiert die „THz-Lücke“ weiterhin.

Die PTB kann auf eine lange Geschichte der THz-Forschung zurückblicken. Erste Experimente mit THz-Strahlung – auch wenn noch nicht so genannt – wurden bereits um 1900 in der Physikalisch Technischen Reichsanstalt (PTR) durchgeführt. Damals bestand die Notwendigkeit, die Strahlungseigenschaften der zu dieser Zeit weit verbreiteten Gasbeleuchtung und der elektrischen Beleuchtung genau zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wurden an der PTR hochgenaue Strahlungsnormale und Detektoren entwickelt, die auch im THz-Bereich funktionierten. Heinrich Rubens, damals Professor an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg (heute: Technische Universität Berlin) entwickelte zur selben Zeit die so genannte Reststrahlenmethode, mit der es möglich war, Strahlung bis zu einer maximalen Wellenlänge von ca. 50 μm zu erzeugen. In Zusammenarbeit mit Friedrich Lummer von der PTR gelang es ihm, das Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers hochpräzise bis in den THz-Bereich hinein zu vermessen. Diese Daten waren die Grundlage für Max Planck, um das nach ihm benannte Strahlungsgesetz zu formulieren. Dies war nicht nur die Geburtsstunde der Quantenphysik, sondern auch ein entscheidender Durchbruch für die Schwarzkörper-basierte Radiometrie [6].

In diesem Artikel soll ein kurzer Überblick über den Entwicklungsstand der THz-Technologie gegeben werden. Zunächst werden potenzielle Anwendungen außerhalb der Wissenschaft diskutiert. Die Realisierung solcher Anwendungen hängt entscheidend von zwei Schlüsselkomponenten ab: Strahlungsquellen und Detektoren. Der Schwerpunkt liegt auf im Dauerstrich betriebenen Komponenten. Gepulste Systeme werden nur am Rand erwähnt. Die wichtigsten Entwicklungen in diesen Bereichen werden kurz skizziert. Abschließend werden Notwendigkeiten und Herausforderungen für die Metrologie diskutiert.

2 THz-Technologie für nicht-wissenschaftliche Anwendungen

Neben den in der Einleitung skizzierten wissenschaftlichen Anwendungen gibt es einen signifikanten und wachsenden Markt für kommerzielle THz-Systeme. Für praktische Anwendungen bedeutsam ist, dass viele Materialien, z. B. Textilien, Kunststoffe und Verpackungsmaterialien im THz-Bereich transparent sind oder zumindest eine hohe Transmission aufweisen. Hinzu kommt, dass viele Substanzen charakteristische Spektren im THz-Bereich haben, anhand derer sie identifiziert werden können. Dies eröffnet neuartige Anwendungen in Materialprüfung, Prozessüberwachung und für Sicherheitskontrollen. Biomedizinische Anwendungen, wie die Lokalisierung von Tumoren erscheinen zumindest prinzipiell möglich. Neue Möglichkeiten gibt es auch für die Übertragung von Daten mit signifikant höherer Informationsdichte als beim derzeit üblichen Wireless Local Area Network oder bei Nutzung von Bluetooth-Verbindungen.

Als Beispiel aus der Materialprüfung sei die Kontrolle des Hitzeschildes des Space Shuttles genannt. Nach dem Columbia-Unglück im Jahr 2003, dass auf einen Defekt am Hitzeschild, verursacht durch beim Start abgerissenes Isolationsmaterial, zurückzuführen war, hat die NASA verschiedene Verfahren zur Detektion dieser Defekte evaluiert. THz-Bildgebung hat sich dabei als die Methode mit der geringsten Fehlerquote herausgestellt [7]. Weitere Anwendungen insbesondere im Kunststoffbereich sind wahrscheinlich und befinden sich in der Erprobung [8].

Für biomedizinische Anwendungen insbesondere die Lokalisation und Identifikation von Tumoren und entzündlichem Gewebe wurden die Grundlagen gelegt [9]. Anwendungen im klinischen Alltag scheinen hier aber noch in weiter Ferne zu liegen, nicht zuletzt wegen der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Tatsache, dass zelluläre Strukturen kleiner sind als THz-Wellenlängen. Für bildgebende oder spektroskopische Diagnose bedeutet dies, dass sehr aufwendige Nahfeldmethoden angewendet werden müssen.

Die Entwicklung von Nachweisgeräten für Sicherheitskontrollen an Flughäfen oder in anderen sicherheitsrelevanten Zonen ist in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, da sich mit THz-Strahlung am Körper verborgene Objekte z. T. über Entfernungen von einigen 10 m detektieren lassen (Bild 1a) [10, 11, 12]. Diese Kameraartigen Systeme, üblicherweise als THz-Scanner bezeichnet, detektieren entweder die vom Untersuchungsgegenstand emittierte THz-Strahlung bzw. die von ihm reflektierte Umgebungstrahlung („passive THz-Bildgebung“) oder sie detektieren die gestreute und reflektierte

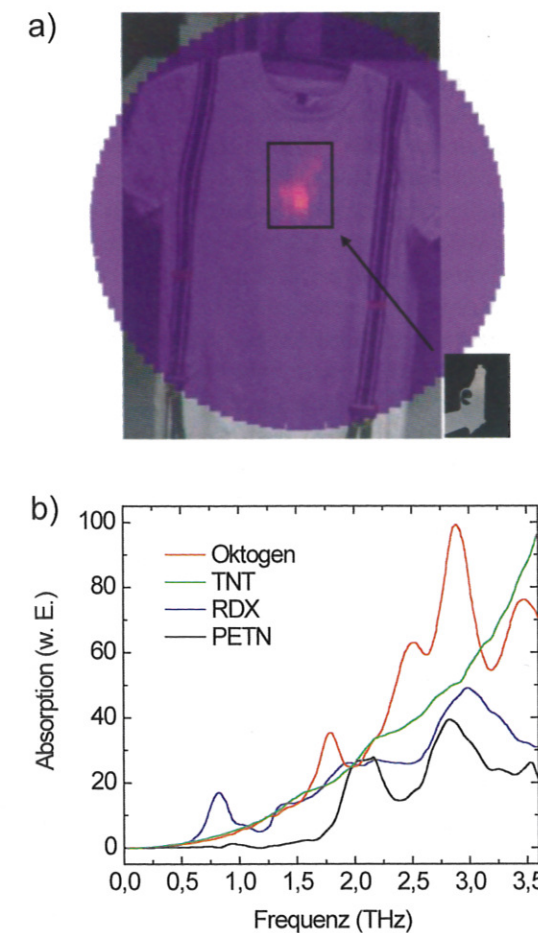


Bild 1:

- a) THz-Bild (farbig) einer von einem T-Shirt verdeckten Waffenattrappe. Das THz-Bild wurde mit einem visuellen Bild der gleichen Szene überlagert (schwarz-weiß). Die Waffenattrappe war 18 m vom THz-Scanner entfernt. Das Bild wurde mit einem aktiven THz-Scanner, der bei 0,8 THz arbeitet, aufgenommen. Die Auflösung beträgt ca. 2 cm und die Bildaufnahmezeit betrug 5 s. Die Waffenattrappe (rosa) ist schemenhaft zu erkennen. Rechts unten ist ein Foto der Waffenattrappe gezeigt [10].
- b) Absorptionsspektren verschiedener Explosivstoffe im THz-Bereich. Die Spektren wurden in Transmission mit einem Fourier-Transform-Spektrometer und kohärenter THz-Synchrotronstrahlung von BESSY II gemessen [13].

Strahlung von einer THz-Strahlungsquelle, die zur Beleuchtung der Szene verwendet wird. Das Potenzial lässt sich noch steigern, wenn es gelingt die bildgebenden Verfahren mit spektraler Analyse zur Sprengstoffidentifikation (s. Bild 1b) zu kombinieren [13].

Die drahtlose Kommunikation und Datenübertragung nimmt rasant zu. Vereinzelt werden für kurzreichweitige Datenübertragung bereits Frequenzen bis zu 100 GHz genutzt. Es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung voranschreitet und in einigen Jahren auch der untere THz-Bereich für die drahtlose Kommunikation genutzt wird. Aufgrund der vergleichsweise großen Absorption durch die Atmosphäre werden solche Anwendungen auf kurze Reichweiten oder

die Kommunikation in geschlossenen Räumen beschränkt bleiben. Erste Konzepte und Experimente, die die Machbarkeit dieser Anwendung zeigen, wurden bereits durchgeführt [14, 15].

Eine besondere Bedeutung im Zusammenhang mit kommerziellen Anwendungen kommt der Untersuchung der Wechselwirkung von THz-Strahlung mit biologischem Material zu, insbesondere im Hinblick auf mögliche gesundheitsschädliche Auswirkungen für den Menschen. Anwendungen in der Sicherheitstechnik, bei denen eine Person mit THz-Strahlung beleuchtet wird, oder drahtlose THz-Kommunikation setzen Menschen der THz-Strahlung aus. Zwar ist THz-Strahlung nicht-ionisierend, so dass die Wahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Gefährdung eher gering ist. Dennoch sind experimentelle Untersuchungen zu diesem Thema zwingend geboten [16].

3 Strahlungsquellen

Ein Kernproblem für die Erschließung des THz-Spektralbereichs ist die Verfügbarkeit von kompakten und in der Frequenz abstimmbaren kohärenten Strahlungsquellen, die einige mW Ausgangsleistung im Dauerstrichbetrieb liefern. Diese Problematik, die sogenannte „THz-Lücke“, ist in Bild 2 veranschaulicht. Im langwelligeren bzw. niederfrequenten Bereich (< 2 THz) sind verschiedene Arten von Mikrowellenoszillatoren wie Rückwärtswellenoszillatoren (BWO, englisch: Backward Wave Oscillator) oder multiplizierte Oszillatoren wie z. B. Gunn- oder YIG (Yttrium-Iron-Garnet)-Oszillatoren mit Vervielfacherstufen verfügbar. Dies sind Dauerstrich-Quellen, allerdings mit stark abfallender Leistung zu höheren Frequenzen hin. Das gleiche gilt für Photomischer-Quellen, bei denen die Differenzfrequenzen von Laserquellen aus dem sichtbaren oder Nahinfrarot-Bereich gebildet wird. Auf der Infrarot-Seite der „THz-Lücke“ gibt es Bleisalz-Diodenlaser, deren niedrigste Emissionsfrequenz ca. 10 THz beträgt. Quantenkaskadenlaser (QCL, englisch: Quantum-Cascade-Laser) basierend auf GaAs/(Al,Ga)As-Heterostrukturen arbeiten unterhalb von ca. 5 THz

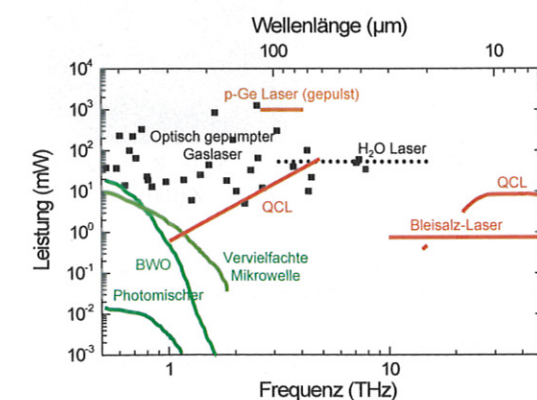


Bild 2: Ausgangsleistung verschiedener THz-Strahlungsquellen als Funktion der Frequenz. Zum Vergleich sind auch einige Infrarot-Laser gezeigt.

und oberhalb von ca. 12,5 THz und schließen die THz-Lücke teilweise. Aufgrund des LO-Phonons in GaAs ist der Bereich zwischen 5 THz und 10 THz für GaAs-basierte QCLs schwer zu erschließen. Optisch oder elektrisch angeregte Gaslaser schließen zwar die THz-Lücke partiell, sind aber sehr komplex und nicht in der Frequenz abstimmbare.

Die Vervielfachung von Mikrowellenquellen z. B. YIG-Oszillatoren, die im Bereich um 10 GHz arbeiten, ist eine Standardmethode zur Erzeugung von THz-Strahlung. Die Emission des Basisoszillators wird zunächst vervielfacht und in einer letzten Verstärkerstufe, die bei maximal ca. 100 GHz arbeitet, verstärkt. Oberhalb dieser Frequenz gibt es derzeit noch keine Verstärker. Stattdessen wird ausschließlich vervielfacht. In Bild 3 ist das Prinzip am Beispiel einer kommerziell erhältlichen Vervielfacher-Strahlungsquelle gezeigt. Die letzte Verstärkerstufe arbeitet in diesem Fall bei ca. 36 GHz. Als Vervielfacher werden Schottky-Dioden eingesetzt, deren nicht-lineare Kapazität (Varactor-Dioden, Abkürzung von „variable capacitor“) oder deren nicht-linearer Widerstand (Varistor-Dioden, Abkürzung von „variable resistor“) zum Vervielfachen genutzt wird. Die Leistung dieser Quellen nimmt zu höheren Frequenzen stark ab und ist bei 1,9 THz maximal wenige 10 μ W. Die Strahlprofile von Vervielfacher-Strahlungsquellen werden durch die Hornantenne, die zur Auskopplung verwendet wird, bestimmt. Diese Antennen liefern exzellente Strahlprofile, die durch den Grundmode des Wellenleiters bestimmt werden, eine Gaußform haben und deren Nebenkeulen unterhalb von -10 dB liegen.

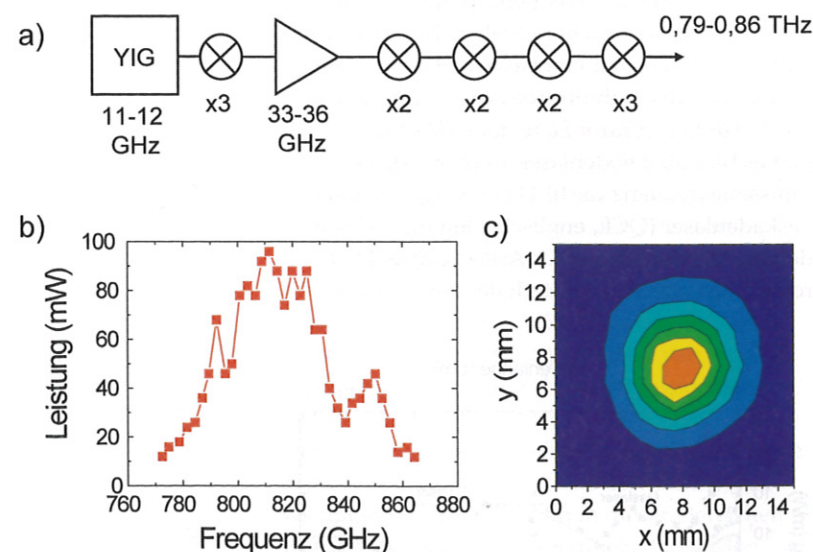


Bild 3:

- Prinzipaufbau einer THz-Strahlungsquelle basierend auf einem vervielfachten YIG-Oszillator. Die Frequenz des YIG wird verdreifacht, dann verstärkt und schließlich in vier Stufen auf 0,79 bis 0,86 THz vervielfacht.
- Ausgangsleistung der in a) gezeigten Quelle.
- Strahlprofil der in a) gezeigten Quelle. Das Strahlprofil wird durch eine Hornantenne bestimmt (nicht in a) gezeigt).

Photomischen ist eine Alternative zu Mikrowellen-basierten Systemen. Wenn man mit diesem Verfahren Dauerstrich-Strahlung erzeugen will, wird die Strahlung zweier Nahinfrarot-Laser in einem nichtlinearen Element gemischt, das die Differenzfrequenz im THz-Bereich erzeugt. Zum Photomischen werden LT-GaAs-Photodioden (LT: low-temperature grown), optimierte pin-Photodioden oder UTC(uni-travelling carrier)-Photodioden verwendet [17], wobei letztere die besten Ergebnisse hinsichtlich Ausgangsleistung zeigen. Neuere Entwicklungen zielen darauf ab, InGaAs-basierte Photomischer zu nutzen. Das ermöglicht es, bei 1,55 μ m zu mischen und kostengünstige Telekom-Komponenten zu verwenden [18]. Nichtsdestotrotz ist die erzeugte Leistung gering, ca. 10 μ W bei 0,5 THz und bis zu 1 μ W bei 1,5 THz. Ein Vorteil dieser Strahlungsquellen ist ihre breite Frequenzabstimmbarkeit. Wenn statt zwei Dauerstrichquellen der Puls eines Femtosekunden-Lasers verwendet wird, erzeugt der Photomischer einen THz-Puls, der sich je nach Mischertyp und Laserpuls von einigen 10 GHz bis zu mehreren THz erstreckt. Solche Systeme finden Anwendung in der Kurzzeitspektroskopie und Bildgebung und haben erheblich zur Erschließung der THz-Lücke beigetragen.

Über viele Jahrzehnte waren optisch gepumpte Gaslaser die Arbeitspferde der THz-Forschung. In diesen Systemen wird die Pumpstrahlung eines CO₂-Lasers in den Resonator des THz-Lasers eingekoppelt, worin sich ein Gas befindet, das die Strahlung des CO₂-Lasers absorbiert. Die Absorption findet auf einem Vibrationsübergang statt und führt zu Besetzungsinversion zwischen zwei Rotationszuständen in dem angeregten Vibrationszustand. Voraussetzungen für ein gutes Lasergas sind eine gute Absorption der Infrarot-Pumpstrahlung und ein reiches THz-Spektrum. HCOOH, CH₃OH und CH₂F₂ sowie ihre Isotopologe sind häufig verwendete Lasergase [19]. Es sind mehr als 1000 Laserfrequenzen bekannt, die den gesamten THz-Bereich überdecken. Waren diese Laser ursprünglich groß und aufwendig in der Bedienung, so werden sie heute auf Forschungsflugzeugen für Astronomie und Erdbeobachtung eingesetzt. Ein solches System fliegt seit mehreren Jahren auf dem Erdbeobachtungssatelliten Aura der NASA, wo es als Lokaloszillator in einem 2,5 THz Heterodynspektrometer eingesetzt wird [20]. Nichtsdestotrotz haben diese Systeme Grenzen hinsichtlich Masse und Leistungsbedarf und handgetragene oder nur wenige kg schwere Systeme scheinen ausgeschlossen zu sein. Eine weitere, wesentliche Einschränkung ist die Tatsache, dass diese Laser nicht in der Frequenz abgestimmt werden können.

Für viele Jahre war der p-dotierte Germanium-Laser der einzige THz-Halbleiterlaser. Sein Betrieb erfordert starke elektrische und magnetische Felder sowie Kühlung auf weniger als 20 K. Dieser Laser emittiert je nach Dotierung und Betriebsparametern Pulse im Bereich von 1 bis 4 THz [21]. Trotz erheblicher Fortschritte hinsichtlich seiner Leistungsparameter und der Betriebsfreundlichkeit hat dieser Lasertyp allerdings keine weite Verbreitung gefunden. Ein Durchbruch im Hinblick auf einen vielseitig einsetzbaren THz-Laser gelang im Jahr 2002 mit der Realisierung des ersten THz-QCL [22]. Dies sind vielversprechende Strahlungsquellen für mannigfaltige Anwendungen. Die THz-QCL basieren auf intersubband-Übergängen von Elektronen im Leitungsband von Halbleiter-Heterostrukturen und sind unipolar. Diese Heterostrukturen sind Schichtsysteme (Übergitter) aus GaAs und (Al,Ga)As. Das Übergitter wird so berechnet und epitaktisch hergestellt worden, dass bei Anlegen einer Spannung ein stufenförmiges Potentialprofil im Leitungsband entsteht. Ein Elektron, das sich entlang dieses Potentialprofils bewegt, emittiert beim Übergang von einer auf die nächst niedrigere Potentialstufe ein Photon [23]. Eigenschaften, die diese Laser besonders interessant für Anwendungen machen, sind ihre kompakte Bauform mit (typischen Größe von 0,2 mm \times 0,01 mm \times 3 mm), ihre niedrige elektrische Eingangsleistung von einigen Watt, eine Ausgangsleistung bis zu einigen 10 mW, Dauerstrichemission im Bereich von 1,2 bis 4,9 THz, eine maximale Betriebstemperatur bis ca. 180 K im gepulsten Betrieb und bis ca. 130 K im Dauerstrichbetrieb, eine schmale intrinsische Linienbreite (<10 kHz) und Einzelmodenbetrieb. Derzeit gibt es allerdings noch keinen QCL, der die hier genannten Leistungsparameter in sich vereint und alle Anforderungen, die für praktische Anwendungen an eine Laserstrahlungsquelle gestellt werden, erfüllt. Insbesondere die Kühlung mit flüssigem Helium oder mit großen, leistungshungrigen (einige kW Eingangsleistung) mechanischen Kühlmaschinen ist eine erhebliche Einschränkung. Einen ersten Schritt zu einem praktisch nutzbaren System stellt die Realisierung eines QCL Lasersystems in einem kompakten Stirlingkühler dar. Dieses System emittiert bei einer Frequenz von 3,1 THz und hat eine Ausgangsleistung von 8 mW im Dauerstrichbetrieb bei einer elektrischen Eingangsleistung von weniger als 240 W (Bild 4) [24].

In den letzten Jahren wurde ein Verfahren zur Erzeugung von intensiver THz-Strahlung auf der Basis eines Elektronenspeicherrings entwickelt [26, 27]. In der sogenannten „low-alpha“-Einstellung der Strahlloptik des Speicherrings werden die Elektronen-Pakete so gebündelt, dass der mittlere Abstand der Elektronen deut-

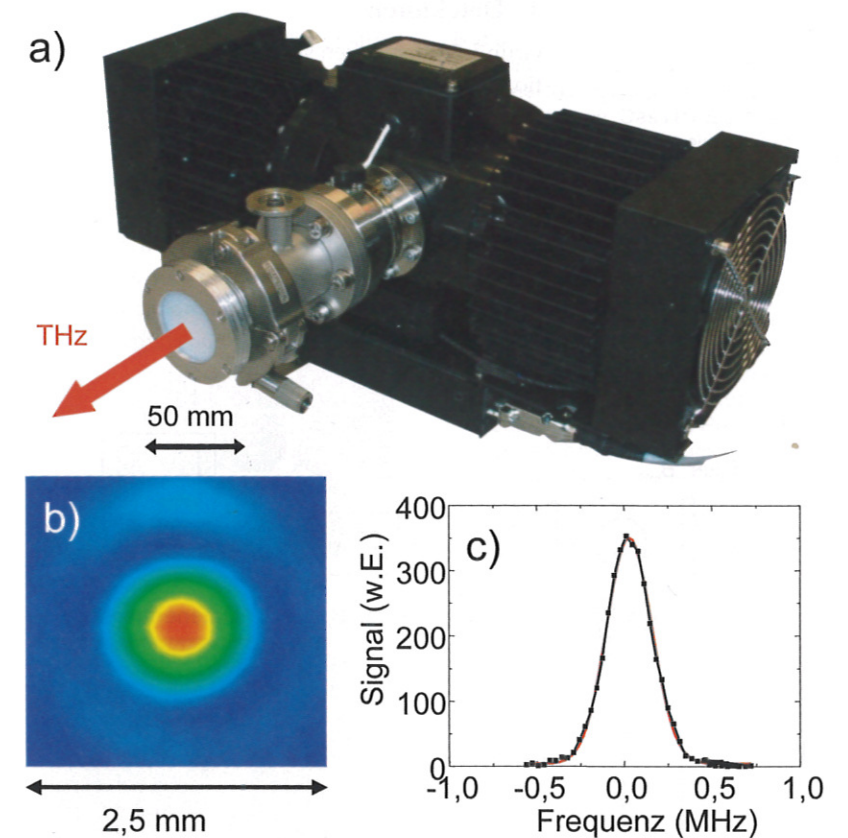


Bild 4:

- Kompakte THz-Strahlungsquelle basierend auf einem QCL und einem Stirling-Kühler. Das System wiegt weniger als 15 kg und benötigt weniger als 240 W elektrische Eingangsleistung, um mehrere mW an THz-Leistung im Dauerstrichbetrieb zu erzeugen [24].
- Strahlprofil des QCL aus a), die Frequenz des QCL ist 3,1 THz.
- Linienbreite eines 2,5-THz-QCL, der auf eine molekulare Absorptionslinie stabilisiert wurde. Das Linienprofil ist gaußförmig und die volle Halbwertsbreite beträgt 300 kHz [25].

lich kleiner ist als THz-Wellenlängen unterhalb von ca. 200 μ m. Dann überlagern sich die von einem Elektronen-Paket emittierten Wellen kohärent und die Strahlungsintensität steigt quadratisch mit der Anzahl der beteiligten Elektronen an. Dieser Effekt, die kohärente Synchrotronstrahlung, tritt im THz-Bereich auf. Der Brillanzgewinn gegenüber der normalen Synchrotronstrahlung beträgt dabei bis zu acht Größenordnungen und die spektral integral abgestrahlte Leistung erreicht etwa 1 W. Die Anwendbarkeit dieser neuen breitbandigen Strahlungsquelle wurde durch spektroskopische Experimente an Supraleitern und Halbleitern sowie auf dem Gebiet der THz-Nahfeld-Mikrospektroskopie bei BESSY an der Infrarotbeamline IRIS gezeigt [28]. Die hohe Brillanz und Stabilität der kohärenten THz-Synchrotronstrahlung gestattet es, auch schwache Signaturen im THz-Bereich zu spektroskopieren.

4 Detektoren

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Detektion unterscheiden: die direkte oder inkohärente Detektion und die kohärente oder Heterodyn-detektion. Bei der direkten Detektion wird die Energie der Photonen bzw. des elektromagnetischen Feldes in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt. Es wird nur die Leistung gemessen. Bei der Heterodyndetektion werden Leistung und Phase des elektromagnetischen Feldes gemessen. Beide Prinzipien sind schematisch in Bild 5 gezeigt.

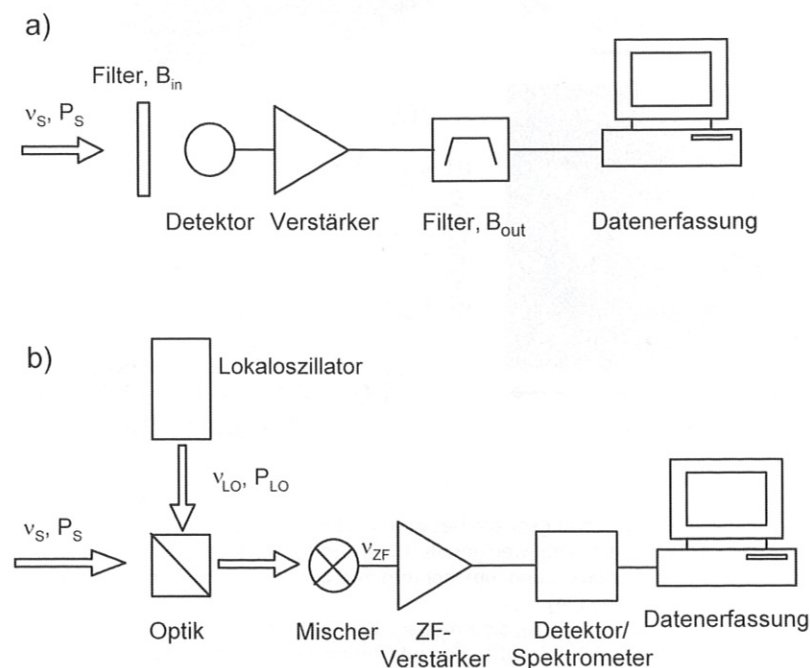


Bild 5:

- a) Schematischer Aufbau eines inkohärenten Detektionssystems;
b) Schematischer Aufbau eines Heterodynempfängers bzw. -spektrometers.

Als direkte Detektoren kommen Kalorimeter, pyroelektrische Detektoren, Bolometer basierend auf Supraleitern oder Halbleitern, oder Photo-leiter zum Einsatz. Diese Detektoren basieren auf den gleichen oder sehr ähnlichen Funktions-mechanismen wie ihre Pendanten in anderen Spektralbereichen. Einige Besonderheiten für Anwendungen im THz-Bereich seien hier kurz diskutiert.

Es werden fast ausschließlich Komposit-Bolometer eingesetzt [29]. Bei diesen sind die beiden Funktionen eines Bolometers, nämlich die möglichst effiziente Absorption der einfallenden Strahlung und die empfindliche Messung der dadurch induzierten Temperaturänderung, auf zwei separate Komponenten aufgeteilt. Auf diese Weise lassen sich beide Funktionen getrennt voneinander optimieren. Als Absorber werden beispielsweise Diamant- oder Saphirplättchen, die mit einer absorbierenden Schicht versehen sind, oder dünne Si_3N_4 -Membranen, auf die eine netzartige metallische Struktur aufgebracht ist,

die ähnlich einer Antenne Strahlung absorbiert, verwendet. Die Funktion des Thermometers kann auf der Basis von halbleitenden oder supra-leitenden Materialien realisiert werden. Als Halbleiter wird in der Regel Silizium oder Ger-manium verwendet. Beide zeigen eine relativ starke Änderung des Widerstandes mit der Tem-peratur. Supraleiter werden als Kantenbolometer betrieben [30], d. h. die Temperatur des Supra-leiters wird so eingestellt, dass sie der Sprung-temperatur des supraleitenden Übergangs entspricht. Die Absorption von Strahlung führt zu einer Änderung der Temperatur und damit zu einer starken Änderung des Widerstands, die gemessen wird. Da die Empfindlichkeit eines Bolometers mit sinkender Temperatur zunimmt, werden Bolometer gekühlt, in der Regel mit flüs-sigem Helium. Für Supraleiter ist die Kühlung ohnehin notwendig, um die für den Betrieb not-wendige Sprungtemperatur zu erreichen.

Bei einem Photoleiter erzeugt ein Photon ein freies Elektron, das die Leitfähigkeit des photoleitenden Materials erhöht. Da die Energie eines THz-Photons sehr viel kleiner ist als die Bandlücke von Halbleitern wird extrinsisches Halbleitermaterial verwendet. Als Beispiel sei Gallium-dotiertes Germanium genannt (Ge:Ga). Die Ga-Akzeptoren haben im Ge-Wirtsmaterial ein Wasserstoff-ähnliches Energiespektrum mit einer Grundzustandsenergie von 11,3 meV [31]. Das Detektormaterial muss gekühlt werden (ca. 4 K), so dass sich alle p-Ladungsträger im Grundzustand befinden. Ein absorbiertes Photon mit einer Energie größer als die Grundzustands-energie regt ein Loch in das Valenzband von Ge an und führt zu einer Leitfähigkeitserhöhung, die gemessen wird. Detektoren dieser Art sind im Bereich von 2,5 bis 6 THz empfindlich und werden für astronomische Anwendungen als Arrays mit bis zu 1000 Bildpunkten hergestellt. Sie werden in astronomischen Satellitenobser-vatorien wie z. B. Herschel eingesetzt. Darüber hinaus ist es ein verbreiteter, kommerziell erhält-licher Detektortyp für wissenschaftliche Anwen-dungen im Labor. Durch Anlegen von externem Druck oder durch andere Dotierungsatome lässt sich die spektrale Empfindlichkeit verschieben.

Eine gewisse Sonderstellung haben photo-akustische und photopneumatische Detektoren, die in dieser Form fast ausschließlich im THz-Bereich zum Einsatz kommen. Bei photoakus-tischen Detektoren wird die THz-Strahlung von einem dünnen Metallfilm absorbiert, der sich er-wärmt und seine Wärmeenergie an ein Gasvolu-men abgibt [32]. Die einfallende THz-Strahlung wird mit einer Frequenz von einigen Hertz zer-hackt und die resultierende frequenzmodulierte Erwärmung des Gases führt zu einer akustischen Anregung im Gasreservoir des Detektors, die mit einem Mikrofon detektiert wird. Beim pho-

topneumatischen Detektor, nach seinem Erfinder auch Golay-Detektor genannt [33], wird die einfallende THz-Strahlung ebenfalls zerhackt und von einem Metallfilm, der ein Gasreservoir begrenzt, absorbiert. Der Metallfilm erwärmt das Gas und dessen daraus resultierende Aus-dehnung führt zur Durchbiegung eines dünnen Metallfilms. Diese Durchbiegung wird optisch gemessen. Mit dem photoakustischen Detektor sind Leistungsmessungen bis hinunter zu we-nigen Mikrowatt möglich und mit dem Golay-Detektor sind Leistungen in der Größenordnung von 100 nW messbar.

Auf dem Heterodynprinzip basieren heutzutage nahezu alle Radio- und Fernsehempfänger. Das Wort Heterodyn hat seinen Ursprung in der griechischen Sprache. Es ist zusammengesetzt aus *heteros*, verschieden, und *dynamis*, Energie. Signale mit zwei geringfügig unterschiedlichen Frequenzen werden in einem elektrischen Schaltkreis „gemischt“, d. h. es werden Sum-men- und Differenzfrequenzen sowie Vielfache erzeugt (Bild 5b). Für das Mischen ist ein nicht-lineares Element oder Medium erforderlich. Ein typischer Heterodynempfänger besteht aus vier Komponenten: dem Lokaloszillator (LO), einem Mischer, der die Differenz/Zwischenfre-quenz von Signal- und Lokaloszillatorstrahlung erzeugt, einer Zwischenfrequenz (ZF)-Verstär-kerstufe und einem Detektor oder Spektrometer zur Darstellung des ZF-Signals [34]. Als Mischer werden Schottky-Dioden, Supraleiter-Isola-tor-Supraleiter (SIS)-Mischer oder Hot-Elec-tron-Bolometer (HEB)-Mischer verwendet. Das Mischen in Schottky-Dioden basiert auf ther-mischer Emission der Elektronen über die Poten-tialbarriere des Metall-Halbleiter-Kontakts. Dies führt zu einer nicht-linearen Strom-Spannungs-kennlinie. Das Mischen in einem SIS-Kontakt basiert auf Photonen-unterstütztem Tunneln von Quasiteilchen durch die Isolationsschicht zwi-schen den beiden Supraleitern. Während Schott-ky-Dioden gekühlt und ungekühlt betrieben werden können und einige mW LO-Leistung be-nötigen, müssen SIS-Mischer auf ca. 4 K gekühlt werden. Sie kommen mit ca. 10 μW LO-Leistung aus. Schottky-Dioden arbeiten im gesamten THz-Bereich, SIS-Mischer funktionieren derzeit materialbedingt jedoch nur bis zu einer höchsten Frequenz von ca. 1,4 THz. HEB-Mischer sind sehr schnelle Kantenbolometer. Um diese Bolo-meter ausreichend schnell zu machen, so dass sie Zwischenfrequenzen von einigen GHz in folgen können, bedient man sich des Supraleiters NbN, der eine schnelle Elektron-Phonon-Wechselwir-kung hat. Die eingekoppelte Strahlung (s. Bild 6) erzeugt freie Elektronen, die ihre Energie schnell an die Phononen im NbN abgeben. Diese wiede-rum entweichen sehr schnell in das Substrat, was dadurch erreicht wird, dass die NbN-Filme sehr

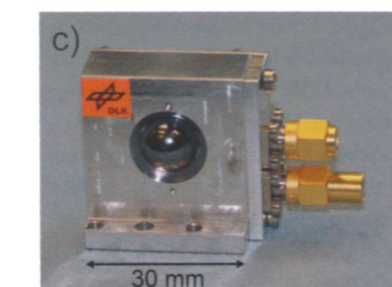
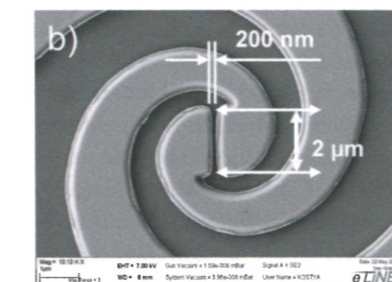
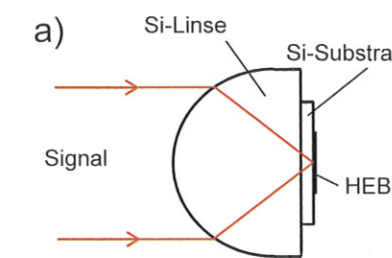


Bild 6:

- a) Schematischer Aufbau eines Detektors mit quasi-optischer Einkopplung. Das Hot-Electron-Bolometer (HEB) ist eingebettet in das Zentrum einer planaren Antenne, z. B. eine logarithmisch-spiralförmigen Antenne wie in b) gezeigt.
b) Elektronenmikroskopische Aufnahme eines HEB, das 200 nm lang und 2 μm breit ist, und sich in Zentrum der spiralförmigen Antenne befindet. HEB und Antenne sind auf einem Silizium-Substrat, das wiederum auf die Rückseite einer Silizium-Linse geklebt ist (a).
c) Hier ist das gesamte Detektorelement gezeigt. Neben der Silizium-Linse auf die Rückseite einer Silizium-Linse geklebt ist (a). Hier ist das gesamte Detektorelement gezeigt. Neben der Silizium-Linse auf die Rückseite einer Silizium-Linse geklebt ist (a). Hier ist das gesamte Detektorelement gezeigt. Neben der Silizium-Linse auf die Rückseite einer Silizium-Linse geklebt ist (a).

dünn (4 bis 5 nm Schichtdicke) hergestellt werden. HEB-Mischer sind etwas weniger empfindlich als SIS-Mischer, aber oberhalb von 1,4 THz die Mischer der Wahl, sofern Kühlung auf 4 K unter Systemaspekten kein Problem ist. Sie sind ca. 10-mal empfindlicher als Schottky-Dioden und benötigen deutlich weniger LO-Leistung (ca. 1 μW).

5 Herausforderungen für die Metrologie

Hinsichtlich der Leistungsmessung im THz-Bereich muss festgestellt werden, dass es derzeit keine generell akzeptierte und eingesetzte Methode gibt. Insbesondere gibt es kein Leistungs-messgerät, das als Standard oder Referenzgerät akzeptiert wird. Die verschiedenen im vierten Abschnitt beschriebenen Detektoren werden je nach Verfügbarkeit und persönlicher Vorliebe der Nutzer als Leistungsmessgerät verwendet. Häufig wird dabei auf die Kalibrierung des Herstellers verwiesen, wenn das Ausgangssignal, in der Regel ein Strom- oder Spannungswert, des betref-fenden Detektors in eine Leistung umgerechnet wird. Der Autor hat die Erfahrung gemacht, dass die Leistungswerte einer Strahlungsquelle ge-messen mit Detektoren, die auf unterschiedlichen Messprinzipien basieren, ohne weiteres um einen Faktor zwei voneinander abweichen können. Erschwerend kommt hinzu, dass Unsicherheiten häufig nicht spezifiziert sind.

Mit der zunehmenden Zahl an Anwendungen werden auch Zahl und Vielfalt der THz-Detektoren zunehmen. Damit sind zwei Herausforderungen für die Metrologie verbunden. Es müssen sowohl die Kalibrierung als auch die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Detektoren hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit, Linearität und spektralen Abdeckung zuverlässig gegeben sein. Bisher ist dies nur unzureichend der Fall. Detektoren in THz-Empfängern für die Astronomie oder Erdbeobachtung werden mit hohem Aufwand und speziell entwickelten Schwarzkörpern kalibriert. Das Spektrum des Schwarzkörpers wird mittels verschiedener Filter spektral definiert und weitere Filter blockieren die unerwünschte thermische Hintergrundstrahlung. Die typische Messunsicherheit beläuft sich auf 10 % bis 20 %. Begrenzend ist die Genauigkeit der Filter sowohl hinsichtlich ihrer Transmission als auch hinsichtlich ihres spektralen Verlaufs. Detektoren für weniger kostspielige Anwendungen sind in der Regel nicht oder nur unzureichend kalibriert. Häufig werden Kalibrierdaten aus dem Infraroten in den THz-Spektralbereich extrapoliert. Die damit verbundenen Ungenauigkeiten sind das Problem der Anwender. Abgesehen von dem zusätzlichen experimentellen Aufwand, der für den Nutzer entsteht, ist auch die Vergleichbarkeit der Daten, die in verschiedenen Laboren mit dem gleichen Detektortyp gemessen werden, schwierig. Die rückführbare Kalibrierung von THz-Detektoren mit einer spezifizierten und zuverlässigen Unsicherheit ist daher unerlässlich, nicht nur für den Vergleich und die Charakterisierung der Detektoren selbst, sondern insbesondere auch für die Qualität der wissenschaftlichen Daten sowie für nichtwissenschaftliche Anwendungen. Vorzugsweise sollten für die Radiometrie zwei unabhängige Verfahren, die in anderen Frequenzbereichen bereits

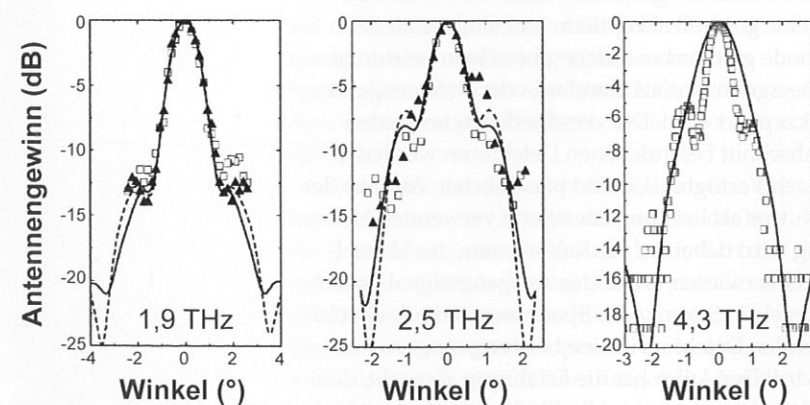


Bild 7: Antennengewinn eines Detektors mit quasioptischer Strahlungseinkopplung wie in Abb. 6 gezeigt. Die Symbole sind Messwerte. Die Linien sind berechnete Antennendiagramme, die geschlossenen Symbole bzw. durchgezogenen Linien und offenen Symbole bzw. gestrichelten Linien gehören zu zwei zueinander orthogonalen Richtungen (nach [35]).

etabliert sind, nämlich die Strahler- und die Empfänger-gestützte Radiometrie zum Einsatz kommen. Diese Verfahren müssen weiterentwickelt und an den THz-Bereich angepasst werden [39, 40]. Ein interessanter Aspekt der Detektor-kalibrierung im THz-Bereich ist die Frage, ob sich THz-Synchrotronstrahlung dafür nutzen lässt [41]. Bei kürzeren Wellenlängen, ist diese Technik etabliert. Inwieweit dies auch bei THz-Wellenlängen möglich ist, bleibt zu untersuchen. Eine notwendige Voraussetzung ist die genaue Charakterisierung des Speicherrings und des Strahlrohres bzgl. ihrer optischen Verluste und die Minimierung dieser Verluste.

Detektoren und Strahlungsquellen haben gemeinsam, dass ihr Strahlprofil sehr genau bekannt sein muss, wenn sie in Systemen, sei es für die Wissenschaft oder sei es für kommerzielle Anwendungen, eingesetzt werden sollen. Ein wichtiges Kriterium ist die Gaußförmigkeit der jeweiligen Profile und die Höhe der Nebenkeulen (Bilder 3, 4, 7). Letztere müssen bis zu 20 dB unter dem Maximalwert liegen. Um dies sicher zu messen, d. h. mit einem Signal-zu-Rausch Verhältnis von 10 oder besser, ist ein Detektor notwendig, der über drei Größenordnungen linear ist oder dessen Abweichung von der Linearität mittels Kalibrierung hinreichend genau bekannt ist.

Frequenzkalibrierungen werden im THz-Bereich an Bedeutung gewinnen. QCLs haben beispielsweise eine, verglichen mit Gaslasern oder vervielfachten Mikrowellenoszillatoren, hohe Frequenzgenauigkeit. Wenn keine Maßnahmen zur Frequenzstabilisierung angewendet werden, beträgt die Frequenzinstabilität als Folge von Strom- und Temperaturschwankungen mehrere MHz innerhalb einer Minute und die Kenntnis der Absolutfrequenz ist begrenzt durch das Messverfahren: Mit einem Fourier-Transform-Spektrometer wird eine Genauigkeit von einigen GHz erreicht und mittels Heterodynspektroskopie ist eine Genauigkeit besser als 1 MHz möglich (Bild 8).

In der Literatur ist eine Fülle von Daten über die dielektrischen Eigenschaften verschiedener für den THz-Bereich wichtiger Materialien veröffentlicht. Die Daten zeigen erhebliche Unterschiede in den Werten von Absorptionskoeffizient und Brechungsindex für nominal gleiche Materialien. Dafür gibt es mindestens zwei Gründe: Erstens können nominal gleiche Materialien als Folge unterschiedlicher Herstellungsprozesse oder als Folge von Alterung tatsächlich unterschiedliche Parameter haben. Dies trifft insbesondere auf Kunststoffe zu. Im Fall von kristallinen Materialien können Restverunreinigungen zu optisch aktiven Zentren führen, die nicht hinreichend charakterisiert sind und daher zu unterschiedlichen optischen Eigenschaften im

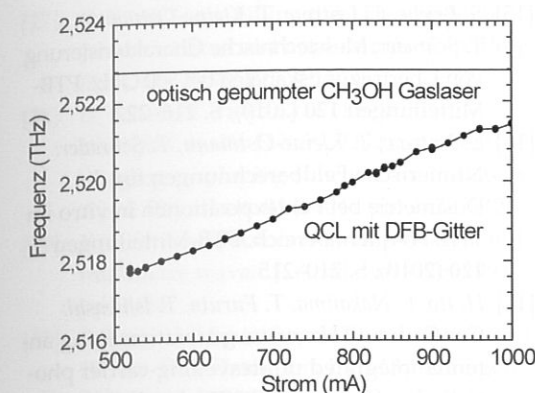


Bild 8: Frequenzmessung eines QCL mit Distributed-Feedback (DFB)-Gitter. Die Frequenz wurde durch Mischen mit der Emission eines Gaslasers bestimmt, dessen Frequenz mit einer Genauigkeit von $\pm 1,8$ MHz bekannt ist (durchgezogene Linie). Die Frequenzgenauigkeit des QCL beträgt ca. ± 10 MHz. Sie wird durch die Frequenzschwankungen des Lasers während der Messzeit eines Datenpunkts bestimmt. Beachtenswert ist die hohe Frequenzauflösung, die mit einem Fourier-Transform-Spektrometer, dessen Frequenzauflösung in der Regel nicht besser als 1 GHz ist, nicht erreichbar ist.

THz-Bereich führen. Der zweite ebenso wichtige Grund sind systematische Messunsicherheiten bei der Bestimmung der optischen Konstanten. Diesem Problem widmete sich eine Ringstudie unter Leitung des National Physics Laboratory [42, 43]. An der Ringstudie beteiligten sich insgesamt 11 Institutionen unter ihnen auch die PTB. Sieben verschiedene Testmaterialien wurden gefertigt und ihr Absorptionskoeffizient und Brechungsindex wurde mit breitbandigen spektroskopischen Techniken (z. B. Fourier-Transform-Spektroskopie) und mit schmalbandigen, kohärenten Strahlungsquellen im Bereich von 30 GHz bis 0,9 THz gemessen. Ein beispielhaftes Ergebnis dieses Vergleichs ist in Bild 9 gezeigt.

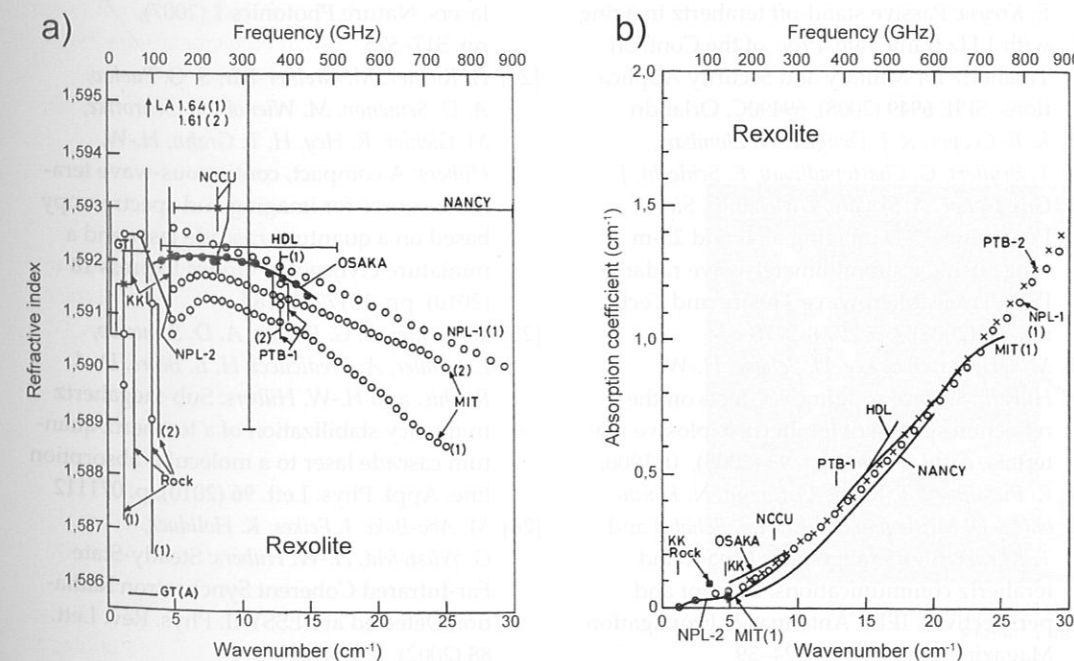


Bild 9: a) Brechungsindex von Rexolite bestimmt bei einer nominalen Temperatur von 293 K. Die Indizes (1) und (2) beziehen sich auf unterschiedliche aber nominal gleiche Proben. b) Absorptionskoeffizienten von Rexolite bestimmt bei einer nominalen Temperatur von 293 K. Die kleinen senkrechten Linien zeigen Resultate, die mit monochromatischen Quellen gemessen wurden und nicht eingezeichnet sind, da sie mit den anderen Messungen überlappen [42, 43].

Das zentrale Resultat dieser Studie ist, dass systematische Messunsicherheiten die Gesamtunsicherheit dominieren. Für die in dieser Studie bestimmten Brechungsindizes war die Messunsicherheit mit weniger als 1 % durchaus akzeptabel. Für die Absorptionskoeffizienten erreichte sie jedoch bis zu einer Größenordnung, insbesondere wenn große Absorptionskoeffizienten zu bestimmen waren. Die Studie zeigt, dass es einen großen Bedarf an der Entwicklung von genauen und reproduzierbaren Messtechniken und an der Entwicklung von Materialstandards für Absorptionskoeffizienten und Brechungsindex gibt. Weitere Ringversuche, insbesondere mit dem Ziel einen größeren Teil des THz-Spektrums abzudecken und unter Einbeziehung neuer Techniken wie der Zeitbereichsspektroskopie, sind ebenfalls von Nöten.

6 Schlussbemerkung

In der Vergangenheit war der THz-Spektralbereich fast ausschließlich von wissenschaftlichem Interesse. Zahlreiche technologische Durchbrüche in den vergangenen Jahren haben dazu geführt, dass kommerzielle Anwendungen in das Zentrum der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gerückt sind. Erste kommerzielle Anwendungen in der Materialprüfung wurden bereits realisiert und weitere Anwendungen z. B. in der zivilen Sicherheit sind in den nächsten Jahren zu erwarten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die THz-Metrologie weiterzuentwickeln, damit sie den zu erwartenden Anforderungen gerecht werden kann. Insbesondere sind rückführbare Leistungs- und Frequenz-Kalibrierungen, vorzugsweise mit mehreren unabhängigen Methoden, Absorptions- und Reflektionsstandards, sowie die Anwendung dieser Methoden und Standards auf neue Technologien notwendig.

Literatur

- [1] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=16>
- [2] <http://www.sofia.usra.edu/>
- [3] <http://science.nrao.edu/alma/index.shtml>
- [4] H. Pickett: The microwave limb sounder THz module on Aura. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* **44** (2006), pp. 122–1130
- [5] S. Ebbinghaus, S. J. Kim, M. Heyden, X. Yu, M. Gruebele, D. Leitner, M. Havenith: Protein sequence- and pH-dependent hydration probed by Terahertz spectroscopy. *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008), pp. 2374–2375
- [6] D. Hoffmann: Schwarze Körper im Labor. *Physikalische Blätter* **56** (2000), pp. 43–47
- [7] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. Lin, J.-S. Hwang, J. Xu, X.-C. Zhang: Compact continuous-wave sub-terahertz system for inspection applications. *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) p. 054105
- [8] S. Wietzke, C. Jördens, N. Krumbholz, B. Baudrit, M. Bastian, M. Koch: Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints. *J. European Optical Soc.* **2** (2007) p. 07013
- [9] R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield, M. Pepper: Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. *Phys. Med. Biol.* **47** (2002), p. 3853
- [10] H.-W. Hübers, U. Böttger, H. Richter, A. D. Semenov: Terahertz imaging system for stand-off detection of threats, *Proc. of the Conf. on Terahertz for Military and Security Applications. SPIE* **6459** (2007), 6549-9, Orlando
- [11] T. May, G. Zieger, S. Anders, V. Zakosarenko, M. Starkloff, H.G. Meyer, G. Thorwirth, E. Kreysa: Passive stand-off terahertz imaging with 1 Hz frame rate, *Proc. of the Conf. on Terahertz for Military and Security Applications. SPIE* **6949** (2008), 69490C, Orlando
- [12] K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, T. Bryllert, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, J. Gill, C. Lee, A. Skalare, I. Mehdi, P. Siegel: Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar. *IEEE Trans. Microwave Theory and Technol.* **56** (2008), pp. 2771–2778
- [13] M. Ortolani, J. S. Lee, U. Schade, H.-W. Hübers: Surface roughness effects on the reflection spectra of terahertz explosive materials. *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008), 081906.
- [14] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schöbel and T. Kürner: Short-range ultra broadband terahertz communications: concept and perspectives, *IEEE Antennas & Propagation Magazine* **49** (2007), pp. 24–39
- [15] S. Priebe, C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader: Messtechnische Charakterisierung von Übertragungskälen bei 300 GHz. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 216–222
- [16] C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader: Numerische Feldberechnungen für die Dosimetrie bei Feldexpositionen in vitro im THz-Frequenzbereich. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 210–215
- [17] H. Ito, F. Nakajima, T. Furuta, T. Ishibashi: Continuous THz-wave generation using antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiodes. *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005), pp. S191–S198
- [18] B. Sartorius, H. Roehle, H. Künzel, J. Böttcher, M. Schlak, D. Stanze, H. Venghaus, M. Schell: All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths. *Optics Express* **16** (2008) pp. 9565–9570
- [19] N.G. Douglas: Millimetre and submillimetre wavelength lasers. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [20] E. R. Mueller, R. Henschke, W. E. Robotham, Jr., L. A. Newman, L. M. Laughman, R. A. Hart, and J. Kennedy: Terahertz local oscillator for the Microwave Limb Sounder on the Aura satellite. *Appl. Opt.* **46** (2007), pp. 4907–4915
- [21] E. Bründermann: Widely tunable far-infrared hot-hole semiconductor lasers. In: H. K. Choi (Hrsg.): Long-wavelength infrared semiconductor lasers. John Wiley & Sons Inc. (2004), pp. 297–350, Hoboken
- [22] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi: Terahertz semiconductor-heterostructure laser. *Nature* **417** (2002), pp. 156–159
- [23] B. S. Williams: Terahertz quantum-cascade lasers. *Nature Photonics* **1** (2007), pp. 517–525
- [24] H. Richter, M. Greiner-Bär, S. G. Pavlov, A. D. Semenov, M. Wienold, L. Schrottke, M. Giehler, R. Hey, H. T. Grahn, H.-W. Hübers: A compact, continuous-wave terahertz source for imaging and spectroscopy based on a quantum-cascade laser and a miniature cryocooler. *Optics Express* **18** (2010), pp. 10177–10187
- [25] H. Richter, S. G. Pavlov, A. D. Semenov, L. Mahler, A. Tredicucci, H. E. Beere, D. A. Ritchie, and H.-W. Hübers: Sub-megahertz frequency stabilization of a terahertz quantum cascade laser to a molecular absorption line. *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010), p. 071112
- [26] M. Abo-Bakr, J. Feikes, K. Holldack, G. Wüstefeld, H.-W. Hübers: Steady-State Far-Infrared Coherent Synchrotron Radiation Detected at BESSY II. *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002), p. 254801
- [27] G. P. Williams: Filling the THz gap-high power sources and applications. *Rep. Prog. Phys.* **69** (2006), pp. 301–326
- [28] U. Schade, K. Holldack, P. Kuske, G. Wüstefeld, H.-W. Hübers: THz near-field imaging employing synchrotron radiation. *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004), pp. 1422–1424
- [29] P. L. Richards: Bolometers for infrared and millimetre waves. *J. Appl. Phys.* **76** (1994), pp. 1–24
- [30] J. Beyer, C. Monte: Supraleitende Bolometer für die THz-Detektion. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 203–209
- [31] E. E. Haller: Advanced far-infrared detectors, *Infrared Phys. Technol.* **35** (1994), pp. 127–146
- [32] http://www.terahertz.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=443
- [33] H. E. Zahl, M. J. E. Golay: Pneumatic heat detector. *Rev. Sci. Instrum.* **17** (1946), pp. 511–515
- [34] H.-W. Hübers: Terahertz heterodyne receivers, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **14** (2008), pp. 378–391
- [35] A. D. Semenov, H. Richter, H.-W. Hübers, B. Günther, A. Smirnov, K. Smirnov, K. I'lin, M. Siegel: Terahertz performance of planar antennas coupled to a hot electron bolometer, *IEEE Trans. Microwave Theory and Technol.* **55** (2007), pp. 239–247
- [36] H.-W. Hübers, A. Semenov, K. Holldack, U. Schade, G. Wüstefeld, G. Goltsman: Time domain analysis of coherent terahertz synchrotron radiation. *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005), p. 184103
- [37] A.-S. Müller, I. Birkel, E. Huttel, Y.-L. Mathis, N. Smale, H.-W. Hübers, A. Semenov, J. Feikes, M. v. Hartrott, G. Wüstefeld, R. Klein, R. Müller, G. Ulm, E. Bründermann, T. Bückle, M. Fitterer, S. Hillenbrand, N. Hiller, A. Hofmann, V. Judin, M. Klein, S. Marsching, K.G. Sonnad: Observation of coherent THz radiation from the ANKA and MLS storage rings with a hot electron bolometer. *Proc. PAC* 2009.
- [38] A. Semenov, O. Cojocari, H.-W. Hübers, F. Song, A. Klushin, A.-S. Müller: Application of zero-bias quasi-optical Schottky-diode detectors for monitoring short-pulse and weak terahertz radiation. *IEEE Electron. Device Lett.* **31** (2010), pp. 674–676
- [39] L. Werner, H.-W. Hübers, P. Meindl, R. Müller, H. Richter, A. Steiger: Towards traceable radiometry in the terahertz region. *Metrologia* **46** (2009), pp. 160–164
- [40] A. Steiger, B. Gutschwager, Ch. Monte, R. Müller, J. Hollandt: THz-Radiometrie. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 198–202
- [41] R. Müller, A. Hoehl, R. Klein, A. Serdyukov, G. Ulm, J. Feikes, M. von Hartrott, G. Wüstefeld: Die Metrology Light Source – eine Strahlungsquelle für die THz-Metrologie. *PTB-Mitteilungen* **120** (2010), S. 229–235
- [42] J. R. Birch et al.: An intercomparison of measurement techniques for the determination of the dielectric properties of solids at near millimetre wavelengths. *NPL report DES 115* (1991)
- [43] J. R. Birch et al.: An intercomparison of measurement techniques for the determination of the dielectric properties of solids at near millimetre wavelengths. *IEEE J. Microwave Theory and Techniques* **42** (1994), pp. 956–965

System application...



System application...



micos
precision made in germany

Take the beautiful! Get the new **MOTION CONTROL** catalog!

Phone: + 49 7634 50 57 - 0 www.micos.ws